

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



ارائه مدل شیارشدگی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده پلیمری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.76444.1135

امیر آقاسی[۱] محسن تربتی‌نژاد[۲] امیر باقرزاده[۳]

چکیده *شیارشدگی یکی از مهم‌ترین خرابی‌های ایجادشده در روسازی‌های آسفالتی می‌باشد که خطرات جدی را برای استفاده‌کنندگان از راه ایجاد می‌کند. هدف از این تحقیق بررسی مقاومت خزشی آسفالت در شرایط مختلف از جمله درصدهای مختلف پلیمر، درصد فضای خالی، دما و تعداد سیکل بار است. همچنین نتایج با کمک شبکه عصبی مدل‌سازی شده اند. بر اساس یافته‌های این تحقیق، قیر ۶۰-۷۰ عملکرد بهتری در برابر شیارشدگی دارد و افزایش پلیمر موجب بهبود عملکرد آن می‌شود. از طرف دیگر مقاومت شیارشدگی مخلوط رابطه معکوس با سیکل بارگذاری دارد. اما وجود پلیمر باعث کاهش نرخ افت مقاومت شیارشدگی بر اثر افزایش سیکل می‌شود. در نهایت نتایج مدل‌سازی نشان داد، مدل شبکه عصبی از نظر پیش‌بینی رفتار خزشی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده پلیمری عملکرد بسیار خوبی دارد.*

واژه‌های کلیدی مخلوط‌های آسفالتی، قیر پلیمری، شیارشدگی، شبکه عصبی، مدل پیش‌بینی.

Modelling of Rutting Behavior of Modified Polymer Asphalt Mixture using Artificial Neural Network

Amir Aghasi Mohsen Torbatinejad Amir Bagherzadeh

Abstract *Rutting is one of the most important damages caused in asphalt pavements, which creates serious risks for road users. The purpose of this research is to investigate the creep resistance of asphalt in different conditions including different percentages of polymer, percentage of air void, temperature and number of load cycles. Also, the results have been modeled with the help of neural network. According to the findings of this research, bitumen with penetration degree 60 to 70 millimeter has a better performance against rutting and the increase of polymer improves its performance. On the other hand, the rutting resistance of the mixture has an inverse relationship with the loading cycle. But the presence of polymer reduces the rate of drop in creasing resistance due to increased cycle. Finally, the modeling results showed that the neural network model performs very well in terms of predicting creep behavior and rutting resistance of polymer modified asphalt mixtures.*

Key words Asphalt mixtures, polymer bitumen, rutting, neural network, prediction model.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/۲/۸و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۵/۲ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، راه و ترابری، استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب.

Email: Aghasi.Amir@wtiau.ac.ir

(۲) کارشناسی ارشد عمران، برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه سراسری گلستان، عضو هیئت علمی مؤسسه آموزش عالی حکیم جرجانی گرگان.

(۳) کارشناسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب.

مقدمه

افزایش قیمت قیر و هزینه‌های ترمیم و بهسازی روسازی‌های آسفالتی در چند سال اخیر موجب شده‌است تا محققان این حوزه بر ارزیابی دقیق‌تر پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی تمرکز جدی‌تری داشته باشند. به‌طوری‌که علاوه بر افزایش قیمت قیر و هزینه‌های اجرایی، کاهش بودجه‌های عمرانی و مشکلات اقتصادی در سطح کلان نیز موجب شده‌است تا اهمیت استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته و ایده‌های جدید در صنعت روسازی بیش از گذشته احساس شود. بر همین اساس، سنجش رفتار روسازی‌های آسفالتی تحت تأثیر متغیرهای عملکردی و محیطی می‌تواند موجب بهبود شرایط اجرایی در زمان طراحی و نگهداری و کاهش هزینه‌های سنگین آزمایشگاهی شود.

یکی از مهم‌ترین خرابی‌های ایجادشده در روسازی‌های آسفالتی، تغییر شکل‌های ایجادشده در سطح آسفالت و عدم مقاومت روسازی در برابر شیارشدگی می‌باشد. به‌طوری‌که تخمین رفتار شیارشدگی در مرحله طراحی می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر عملکرد بلندمدت و عمر خدمت‌دهی روسازی داشته باشد. شیارشدگی عمدتاً در هوای گرم و در مسیر چرخ وسایل نقلیه به موازات محور طولی راه رخ می‌دهد و هزینه‌های سنگینی صرف تعمیر روسازی‌های تخریب‌شده می‌شود. شیارشدگی به‌دلیل تأثیر به‌سزای آن بر کیفیت خدمت‌دهی روسازی و مشکلات اساسی و ایمنی که در ساختار روسازی ایجاد می‌کند، جزو خرابی‌های سازه‌ای و بنیادی مطرح می‌شود. عوامل مختلفی از جمله تکرار بارگذاری ناشی از عبور وسایل نقلیه سنگین، کیفیت نامناسب مخلوط آسفالتی، شرایط محیطی و دمایی، جنس و نوع دانه‌بندی مصالح سنگی و خصوصیات فنی قیر مصرفی تأثیر قابل‌توجهی بر شدت و مقدار شیارشدگی دارند[1-4]. شیارشدگی معمولاً در لایه‌های آسفالتی و لایه‌های غیر محدود زیرین رخ می‌دهد و معمولاً به شکل فرورفتگی سطحی در مسیرهای چرخ و براثر تنش‌های برشی افقی ناشی از اصطکاک لاستیک در هنگام ترمزگیری مکرر خودروها و در قسمت‌های طولانی و شیب‌دار بزرگراه‌ها رخ می‌دهد[3]. تغییر شکل‌های دائمی رخ‌داده در روسازی از ترکیب سه مد مختلف تخریب مواد و مصالح روسازی، تراکم لایه‌های آسفالتی و تغییر شکل‌های پلاستیکی جانبی تشکیل می‌شود. تخریب مواد ناشی از وجود مصالح باکیفیت نامناسب و مقاومت پایین است و سهم کمی از عمق شیارشدگی را دربرمی گیرد. درحالی‌که تراکم لایه آسفالتی و تغییر شکل‌های پلاستیک دو دلیل مهم بروز تغییر شکل‌های اساسی در روسازی هستند و باعث رفتار خزشی می‌شوند[5]. تراکم لایه‌های آسفالتی عامل اولیه شیارشدگی در مراحل اولیه خدمت‌دهی روسازی آسفالتی است و فضای خالی بیشتر در روسازی با بروز تغییر شکل‌های دائمی و شیارشدگی رابطه مستقیم دارد[6].

در چند سال گذشته افزایش شدت و گستره خرابی‌ها در سطح جاده‌ها و ازدیاد بار ترافیک و کاهش بودجه‌های اختصاص‌یافته به بخش تعمیر و نگهداری راه موجب شده‌است تا اصلاح خصوصیات روسازی‌های آسفالتی بیش از قبل موردتوجه قرار گیرد. به‌طوری‌که در چند سال گذشته روش و تکنولوژی‌های مختلفی در راستای بهبود کیفیت و خدمت‌دهی روسازی‌ها استفاده شده‌است. هدف از بررسی و اجرای همه این روش‌ها، بهبود خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی ازنظر فنی و عملکردی می‌باشد. این در حالی است که علاوه بر بحث فنی، جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی افزودنی‌های مصرفی در صنعت روسازی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌طوری‌که در چند سال گذشته، استفاده از مواد مختلف تحت عنوان اصلاح‌کننده‌های خواص روسازی مطرح‌شده‌است و هرکدام با توجه به ویژگی‌ها و خواص منحصربه‌فرد خود، توانسته‌اند موردتوجه محققان و مجریان قرار گیرند

در سال‌های اخیر محققان علم روسازی، به دنبال روش‌های جایگزین با سرعت‌بالا و هزینه کم جهت پیش‌بینی رفتار روسازی هستند. تجربه‌های علمی نشان داده‌است استفاده از مدل‌های کارآمد و مناسب در هر سیستم می‌تواند موجب تأثیر قابل‌توجهی بر دقت برنامه‌ریزی‌های عملیاتی و بهینه‌سازی تخصیص بودجه داشته باشد. با توجه به رفتار ویسکوالاستیک و تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر خصوصیات بلندمدت بتن آسفالتی، تخمین رفتار روسازی کار پیچیده‌ای است و روش‌ها و تکنیک‌های مناسبی را طلب می‌کند. بنابراین، موضوع مدل‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای روسازی تحت تأثیر شرایط مختلف اجرایی و محیطی درحال‌توسعه است. در سال‌های اخیر، شبکه‌های عصبی به‌عنوان یکی از بهترین و قابل‌اعتمادترین روش‌های ابتکاری در پیش‌بینی رفتار مواد مطرح شده‌است. شبکه‌های عصبی با پردازش داده‌های تجربی قانون نهفته بین متغیرهای یک مدل را شناسایی کرده و به نحوی مناسب و با سرعت‌بالا به ساختار شبکه انتقال می‌دهد. برخی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد شبکه‌های عصبی ازجمله تفکیک الگوها، رباتیک، کنترل، یادگیری نگاشت خطی و یا

غیرخطی و قابلیت یادگیری، پردازش توزیعی و قابلیت تعمیم دهی موجب شده‌است تا نگاه ویژه‌ای به این روش در سطح کاربردی شود. به‌طوری‌که، استفاده از شبکه‌های عصبی در زمینه‌های مختلف مهندسی عمران و در تحلیل مسائل پیچیده به‌دلیل قابلیت بالای آن‌ها در پیش‌بینی رفتار مواد رواج زیادی پیداکرده‌است و به‌عنوان جایگزینی مناسب نسبت‌به روش‌های سنتی مطرح شده‌است.

با توجه به مباحث مطرح‌شده، با توجه به نیاز ارزیابی عملکرد روسازی در مرحله طراحی و خدمت‌دهی و قدرت و توانایی شبکه‌های عصبی در تخمین خصوصیات مواد، هدف اصلی این پژوهش پیش‌بینی رفتار خزشی و شیارشدگی بتن آسفالتی اصلاح‌شده با قیر پلیمری تحت تأثیر متغیرهای محیطی و ساختاری مخلوط به کمک شبکه‌های عصبی قرار داده‌شده‌است.

مرور بر مطالعات پیشین

افزایش وسایل نقلیه و عدم توجه جدی به ترمیم و نگهداری راه‌ها در چند سال اخیر باعث شده‌است تا خرابی‌ها جاده‌ها به شکل قابل‌توجهی افزایش یابد. به‌طوری‌که امروزه، سطح زیادی از جاده‌های کشور دچار خرابی‌های شدید و گسترده شده‌اند و این موضوع تحقیقات علمی زیادی برای برون‌رفت از مشکل را طلب می‌کند.

مواد پلیمری، از رایج‌ترین و پرکاربردترین مواد افزودنی می‌باشد که با تشکیل شبکه پلیمری موجب افزایش قابل‌توجه مقاومت و استحکام روسازی‌های آسفالتی می‌شود. پلیمرها با تشکیل زنجیره سه‌بعدی پلیمری در قیر باعث می‌شود تا خواص الاستیک و شکل‌پذیری مخلوط به‌طور قابل‌توجه بهبود یابد و مقاومت شیارشدگی و عمر خستگی روسازی افزایش یابد.

در چند سال گذشته، پلیمر SBS به‌دلیل خواص منحصربه‌فرد و ویژه به‌طور قابل‌توجهی موردتوجه ویژه قرارگرفته و برخلاف سایر افزودنی‌ها علاوه بر تحقیقات آزمایشگاهی، به‌طورجدی در روسازی جاده و مسائل اجرایی ورود گرده و نتایج بسیار مطلوبی را نیز نشان داده‌است. این پلیمر از زنجیره سه بلوکی استایرن– بوتادین– استایرن با دامنه پلی استایرن سفت و محکم و پلی بوتادین انعطاف‌پذیر تشکیل می‌شود. ساختار پلیمر SBS به‌گونه‌ای می‌باشد که بلوک‌های پلی بوتادین با گروه‌های با بار مثبت در قیر از طریق الکترون‌های π تعامل برقرار می‌کنند و بلوک‌های پلی استایرن با گروه‌های الکترونی قیر از طریق پروتون‌های آروماتیک واکنش انجام می‌دهند. برآیند این فعل‌وانفعال موجب می‌شود تا پلیمر SBS با واکنش با قیر و جذب مالتین موجود در قیر، منجر به تشکیل زنجیره پلیمری و بهبود خواص الاستیک و شکل‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی شود[7-9]. در ادامه بخشی از مهمترین مطالعات این حوزه مورد بررسی قرار گرفته‌است.

زیاری و همکاران[10] در دانشگاه علم و صنعت، با توجه به تأثیر منفی رطوبت بر در مخلوط‌های آسفالتی گرم، به بهبود خصوصیات روسازی در برابر شرایط جوی پرداختند. آن‌ها با این رویکرد که تغییر در نوع دانه‌بندی و استفاده از قیرهای اصلاح‌شده تأثیر به‌سزایی در کاهش نفوذ آب به سنگ‌دانه‌ها و درنتیجه کاهش حساسیت رطوبتی داشته باشد، به ارزیابی تأثیر انواع پلیمر ترموپلاستیک الاستومرها بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای پرداختند. یافته‌های این مطالعه نشان داد، با افزایش درصد پلیمر، مدول برجهندگی و نسبت آن، مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم، شاخص حساسیت رطوبتی و هم‌چنین استقامت مارشال و نسبت تر به خشک آن افزایش‌یافته و نتایج بهتری در درصدهای بالا نسبت‌به SBS ۵٪ از خود نشان می‌دهند.

در تحقیقی که با رویکرد نقش مکمل و هم‌زمان مواد افزودنی توسط ساعدی و همکاران [11] سال ۱۳۹۶ انجام شد، تأثیر SBS و الیاف بر عملکرد مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه بررسی شد. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که نمونه‌های حاوی SBS به‌تنهایی ترکیب پلیمر و الیاف به طرز قابل‌توجهی تغییر شکل پلاستیک روسازی را کاهش می‌دهد و مقاومت شیارشدگی را بهبود می‌بخشد. هم‌چنین، استفاده هم‌زمان SBS و الیاف در آسفالت می‌تواند علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، تأثیر شایانی در مقابله با پدیده شیارشدگی ایفا کند و گزینه مناسبی برای مناطق گرم و دارای ترافیک سنگین محسوب گردد.

در یکی دیگر از مطالعات بررسی خواص مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده پلیمری در سال ۱۳۹۶ که توسط صاحب‌الزمانی و همکاران [12]، این بار و باهدف تسهیل استفاده از پلیمر در مخلوط‌های آسفالتی، از گرانول پلیمری SBS در حین فرایند تولید آسفالت در کارخانه آسفالت و به‌طور مستقیم به داخل میکسر استفاده شد. برای سنجش رفتار مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر اضافه کردن خشک پلیمر، سختی و خصوصیات مقاومتی بتن آسفالتی در برابر ترک‌های حرارتی،

ترک‌های خستگی، شیارشدگی مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌های این مطالعه نشان داد، خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با گرانول پلیمری دارای نتایج مشابهی در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده از قیر اصلاح‌شده باSBS و به‌طور قابل‌توجهی خواص مخلوط آسفالتی بهبود می‌یابد.

فخری و همکاران [13] سال ۱۳۹۷ در مطالعه‌ای باهدف سنجش مقاومت شیارشدگی و خواص خودترمیم بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با پلیمر انجام شد، یافته‌ها نشان داد نتایج نشان داد که پلیمر الاستومرها SBR با افزایش خاصیت الاستیکی قیر بیشترین قابلیت بازیابی را برای نمونه‌های آسفالتی فراهم آورده‌است. درحالی‌که پلیمر SBS با ایجاد ٦۰ درصد قابلیت بازیابی، دارای بیشترین عمر خستگی و بالاترین مقاومت شکست در برابر بارهای ترافیکی می‌باشد.

ارزیابی عمر خستگی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پلیمر SBS همواره به‌عنوان یکی از چالش‌های محققان بوده‌است و تحقیقات زیادی در این خصوص انجام شده‌است. در همین خصوص، سنجش رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی با آزمایش‌های پیشرفته توسط صبوری و همکاران [14] سال ۲۰۱۸ نشان داد، SBS با ایجاد شبکه پلیمری در قیر و بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی، موجب افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. هم‌چنین خدایی و همکاران [15] در سال ۲۰۰۹ در دانشگاه امیر کبیر نشان دادند SBS به‌طور قابل‌توجهی موجب بهبود مقاومت شیارشدگی و کاهش تغییرشکل‌های ماندگار در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و مخلوط حاوی قیر با ۵ درصد پلیمر عملکرد شیارشدگی بهتری نسبت‌به مخلوط‌های حاوی ٤ و ٦ درصد SBS دارد و به‌عنوان درصد بهینه این افزودنی می‌باشد.

در مطالعات مربوط به بررسی تأثیر پلیمر بر خواص قیرها نتایج مقالات و تحقیقات انجام شده توسط میرزاییان و همکاران [16]، افلاکی و همکاران [17] و جعفری و همکاران [18] در بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ نشان داد پلیمر SBS موجب کاهش حساسیت دمایی قیرها در دمای بالا و بهبود رده عملکردی قیر می‌شود ولی تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار دمای پایین قیرها ندارد. هم‌چنین، پلیمر SBS به قیر موجب بهبود خواص پیرشدگی و افزایش مقاومت قیر در برابر صدمات وارده ناشی از پیرشدگی می‌شود و با افزایش درجه عملکردی دمای بالا و پایین، موجب بهبود رده عملکردی قیر و درنهایت پوشش مناطق مختلف آب‌وهوایی ایران می‌شود.

در زمینه استفاده از شبکه عصبی در زمینه مدل‌سازی رفتار مخلوط‌های آسفالتی نیز مطالعاتی صورت گرفته‌است. دیواندری و همکاران [19] سال ۱۳۹۷ در راستای استفاده از شبکه‌های عصبی و پیش‌بینی رفتار مخلوط‌های آسفالتی، این بار از شبکه‌های عصبی در تخمین مقاومت شیارشدگی استفاده کردند. آن‌ها در مطالعه خود بیان کردند که شیارشدگی یکی از شایع‌ترین انواع خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی است و افزایش میزان تغییر شکل‌های ماندگار که خود منجر به افزایش عمق شیار می‌گردد، می‌تواند مشکلات جدی در روسازی راه‌ها ایجاد نماید. بر همین اساس، هدف این مطالعه را تخمین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی و تعیین پارامترهای مستقیم و تأثیرگذار در این خصوص بیان کردند. برای طراحی مدل شیارشدگی از مصالح سنگی سیلیسی و آهکی، دانه‌بندی‌های شماره ۵ و ٤ ، قیر و ٦۰ –۷۰ ۱۰۰ –۸۵ و فیلر پودر سنگ و آهک استفاده شد. یافته‌های این مطالعه نشان داد، برای مصالح سنگی سیلیسی در شرایط مشابه، عمق شیار حاصل از دستگاه ویل تراک با فیلر پودر سنگ بیشتر از نمونه‌هایی بود که فیلر آهک در ساخت آن‌ها استفاده‌شده بود. هم‌چنین، مخلوط‌های حاوی مصالح آهکی با فیلر پودر آهک، به‌مراتب مقاومت شیارشدگی کمتری نسبت‌به نمونه‌های مشابه ساخته‌شده از مصالح سیلیسی را داشتند. درنهایت نتایج بخش مدل‌سازی نشان داد، بهترین ساختار دارای ضریب ۰/۹۲ در مرحله آموزش و ۰/۹۰ مرحله آزمایش می‌باشد و مدل طراحی‌شده با شبکه عصبی قدرت و توانایی مناسبی در پیش‌بینی رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر جنس مصالح سنگی و فیلر دارد.

سال ۱۳۹۸ خبیری و همکاران [20] با هدف بررسی خصوصیات لغزندگی روسازی‌ها تحت تأثیر متغیرهای مؤثر، از شبکه‌های عصبی استفاده کردند. آن‌ها در مطالعه خود، تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر مشخصات بافت رویه و مصالح سنگی، شرایط آب‌وهوایی، تغییرات فصلی و آلودگی سطح جاده را بر روی مقاومت لغزندگی موردسنجش قراردادند. در این مطالعه مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده تحت تأثیر آلاینده‌هایی نظیر، ریز گردها، ماسه‌بادی، روغن، پودر لاستیک، دوده اگزوز و رنگ سرد ترافیکی در درجه حرارت و رطوبت‌های مختلف تحت آزمایش آونگ انگلیسی قرارگرفته‌اند. یافته‌های این مطالعه نشان داد، حضور آلاینده‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت لغزندگی روسازی دارد و در حالت خشک بیشترین کاهش به‌دست‌آمده در عدد

لغزندگی هنگامی است که سطح از ماسه‌بادی پوشیده شده باشد و در حالت مرطوب نیز حضور رنگ سرد ترافیکی موجب کاهش عدد لغزندگی را در پی داشته‌است.

سال ۱۳۹۹ فرج‌الهی و همکاران [21] در تحقیقی از شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی شاخص وضعیت روسازی (PCI) و به‌منظور شناسایی بهینه‌ترین زمان تعمیر و نگهداری در جهت کاهش هزینه‌ها استفاده کردند. در این تحقیق به‌منظور مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی، از دو مدل رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی انتشار برگشتی استفاده شد و خرابی‌های سه آزادراه کربلا، پل زال و تهران – قم موردبررسی قرار گرفتند. پارامترهای ورودی به شبکه عصبی شامل طول عمر قطعه در زمان بازرسی، عرض واحد نمونه، متوسط ترافیک عبوری، متوسط درصد وسایل نقلیه سنگین در طول عمر قطعه، بیشینه دما در طول عمر قطعه،کمینه دما و ضخامت روسازی انتخاب شدند. یافته‌های این پژوهش نشان داد، میزان عملکرد مدل شبکه عصبی بر اساس شاخص میانگین مربعات خطا و هم‌چنین شاخص ضریب همبستگی به‌ترتیب برابر است با ۰/۹۵و ۰/۸۷می‌باشد که در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چندگانه دارای قدرت و دقت بیشتری برای پیش‌بینی وضعیت آینده روسازی می‌باشد.

فخری و همکاران [22] سال ۱۴۰۰ در مطالعه‌ای که باهدف مدیریت و نگهداری اصولی راه‌ها برنامه‌ریزی‌شده بود، با استفاده از شبکه‌های عصبی شاخص بین املی ناهمواری روسازی را برحسب متغیرهای خرابی سطحی پیش‌بینی کردند. هدف اصلی این پژوهش بر مبنای تعیین تأثیر خرابی‌های سطحی بر ناهمواری روسازی و ایجاد رابطه همبستگی برای تخمین شاخص بین‌الملل ناهمواری و سرعت رشد ناهمواری قرار داده شد. با استفاده از نتایج این مطالعه، ابتدا تأثیر خرابی‌های سطحی بر شاخص بین المللی ناهمواری تعیین شد و هم‌چنین استفاده از شبکه عصبی مدلی کم‌هزینه برای متولیان راه برای تخمین شاخص ناهمواری و نرخ رشد ناهمواری بر اساس خرابی‌های سطحی در سطح شبکه مطرح شد تا علاوه بر دید مناسب در مرحله طراحی و نگهداری، به شناخت روند اضمحلال و سیاست‌ها و اقدامات تعمیر و نگهداری نیز کمک شایانی شود.

ژیایو و همکاران [23] سال ۲۰۰۹ با استفاده از شبکه‌های عصبی به پیش‌بینی رفتار آسفالت لاستیکی شامل مصالح سنگی بازیافتی و عمر خستگی آن‌ها بر اساس سختی آسفالت و به کمک شبکه عصبی پرداختند. در این مطالعه جهت پیش‌بینی عمر خستگی آزمایش خستگی تیر خمشی و معیار سختی استفاده شده‌است. برای به دست آوردن مدل خستگی، از نتایج آزمایش‌های مدول برجهندگی و مقاومت کشش غیرمستقیم آسفالت، سختی خزشی قیر در آزمایش BBR در دمای۱۲– ، ویسکوزیته قیر و درصد قیر استفاده شده‌است. نتایج به‌دست‌آمده بیان کرد مدل حاصل از شبکه عصبی دقت و ضریب همبستگی بسیار بالاتری نسبت‌به مدل خطی دارد. هم‌چنین، نتایج بخش تحلیل حساسیت نشان داد، سختی خزشی قیر در دمای ۱۲– بیشترین تأثیر را بر سختی آسفالت در دمای ۵ درجه و مقاومت کشش غیرمستقیم آسفالت بیشترین اثر را بر سختی آسفالت در دمای ۲۰ دارد.

وو و همکاران [24] سال ۲۰۱٤ به بررسی عامل شدت تنش در ارائه مدل ترک‌های خستگی و انعکاسی ایجادشده در روسازی به کمک شبکه عصبی پرداختند. در این مطالعه از متغیرهای مدول دینامیکی آسفالت، ضخامت آسفالت، مدول دینامیکی اساس، ضخامت اساس، مدول دینامیکی خاک بستر، طول ترک و نسبت طول ترک به ضخامت لایه رویه استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد هر دو مدل رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی دارای مقبولیت بالایی در پیش‌بینی خرابی‌های ایجادشده در روسازی براثر شدت تنش وارده دارند ولی با توجه به ضریب همبستگی بالاتر و نسبت خطای کم‌تر مدل شبکه عصبی، اعتبار و کارایی این مدل نسبت‌به مدل رگرسیونی بیش‌تر می‌باشد.

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، باوجود مطالعات انجام‌شده در خصوص اصلاح مشخصات فنی آسفالت با SBS و استفاده از شبکه‌های عصبی در تخمین متغیرهای روسازی‌های آسفالتی، اما تاکنون مطالعه‌ای در خصوص پیش‌بینی رفتار شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از شبکه‌های عصبی انجام نشده‌است. لذا نتایج این تحقیق می‌تواند کمک شایانی در کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و افزایش سرعت و دقت مراحل طراحی داشته باشد.

متدولوژی و روش مدل‌سازی

مواد و مصالح

مصالح سنگی. جنس و دانه‌بندی مصالح سنگی تأثیر به‌سزایی بر عملکرد و باربری روسازی‌های آسفالتی دارد. به‌طوری‌که مصالح

سنگی درواقع استخوان‌بندی و ساختار اصلی مخلوط آسفالتی است و نقش مهمی بر مقاومت در برابر خرابی روسازی دارد. سنگدانه‌های مصرفی در مخلوط‌های آسفالتی باید ازلحاظ اندازه دانه‌ها در محدوده معینی باشد و نسبت معینی از هراندازه وجود داشته باشد. جهت تهیه مخلوط‌های آسفالتی از مصالح آهکی از معدن اسب چران رودهن با دانه‌بندی شماره ٤ آیین‌نامه روسازی ایران استفاده شده‌است. مصالح سنگی مصرفی طبق آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران در حدود مجاز آیین‌نامه بوده‌است و ازنظر حداقل میزان شکستگی، حداکثر سایش و حداکثر جذب آب را تأمین می‌کند. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی مورداستفاده در این مطالعه، در جدول (۱) نشان داده شده‌است.

قیر. در این پژوهش از دو نوع قیر ٦۰/۷۰ با رده عملکردی PG64-22 و ۸٥/۱۰۰ با رده عملکردی PG58-22 به‌عنوان قیرهای مرجع در ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده‌است که از پالایشگاه نفت جی تهیه شده‌است. آزمایش‌های کیفی قیر نیز مطابق آنچه در نشریه ۲۳٤ توصیه شده‌است، انجام و نتایج با حدود مجاز نشریه کنترل شد. خصوصیات قیرهای مصرفی در این مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده‌است.

جدول ۱ مشخصات مصالح سنگی مصرفی

شرح آزمایش	نتایج آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳٤		استاندارد آزمایش	
		آستر	رویه	AASHTO	ASTM
حداکثر سایش به روش لوس‌آنجلس (درصد)	۲٥	٤۰	۳۰	T 96	-
حداکثر ضریب تورق با روش BS812 (درصد)	۱٤	۳۰	۲٥	-	-
حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ٤	۹٦	۸۰	۹۰	-	D5821
حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)	۰/۹	۲/٥	۲/٥	T 85	-
حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)	۱/۷	۲/۸	۲/٥	T 84	-

جدول ۲ خصوصیات قیر مصرفی

روش‌های آزمایش	قیر ۷۰-٦۰	قیر ۱۰۰-۸٥	عنوان آزمایش‌ها
ASTM D5	٦٦	۹٤	درجه نفوذ، mm ۰/۱ ، ۲٥˚C @
ASTM D36	٤۸/٥	٤۳/۳	نقطه نرمی، ˚C
ASTM D3289	۱۰۱٤	۱۰۰۲	چگالی، ٦۰˚F @ ، Kg/M3
ASTM D92	۳۳٥	۳۱۲	دمای نقطه اشتعال، ˚C

پلیمر و قیر پلیمری تولید شده. در این پژوهش با توجه به تأثیرات مثبت پلیمر SBS در خواص اصلاح‌کنندگی قیر و آسفالت، برای بهبود عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی از آن استفاده شده‌است. در این مطالعه از پلیمر SBS ساخت شرکت پلیمر پیشرفته دانا در قیرها و مخلوط‌های آسفالتی به‌میزان ۲، ٤ و ٦ استفاده شده‌است. مقادیر انتخاب‌شده برای پلیمر و نیز شیوه اختلاط پلیمر در قیر بر اساس مطالعات قبلی [16, 25, 26] انتخاب شده و به دلایل زیر درصد بالاتر افزودنی توصیه نمی‌شود:

- قیمت بالای افزودنی و عدم توجیه مالی و اقتصادی
- افزایش قابل‌توجه ویسکوزیته قیر و عدم کارایی لازم در زمان اجرا و تراکم
- تأثیر منفی درصدهای بالاتر افزودنی بر خواص دمای پایین و ویسکوزیته قیر
- احتمال دو فازه شدن و عدم ذخیره‌سازی مناسب قیرهای پلیمری حاوی درصدهای بالای SBS

مشخصات SBS مصرفی در جدول (۳) نشان داده شده‌است. برای تهیه قیرهای اصلاح‌شده پلیمری با SBS، ابتدا قیر در حدود ۱٥۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند و پلیمر در درصدهای تعیین‌شده به قیر اضافه شد. سپس مخلوط قیر و پلیمر تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم و با استفاده از همزن برش بالا در سرعت ٤۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت‌زمان ٦۰ دقیقه اختلاط نهایی انجام شد. خصوصیات قیرهای اصلاح‌شده بر اساس نوع و مقدار مواد افزودنی در جدول (٤) نشان داده شده‌است.



شکل ۱ پلیمر SBS و نحوه اختلاط آن با قیر

جدول ۳ مشخصات پلیمر SBS مصرفی

خواص	روش آزمایش	واحد	مقدار و مشخصات	محدوده و مشخصات
حالت فیزیکی	–	–	جامد	–
رنگ	–	–	سفید	–
مقدار استایرن	ASTM D5775	%	۳۰	۲۹/۵ ~ ۳۲/۵
چگالی نسبی	ASTM D792	–	۰/۹٤	N/A
ماده فرار	ASTM D5668	%	۰/۲۵	≤ ۰/۵

جدول ٤ شرایط قیرهای اصلاح‌شده

کد نمونه	نوع قیر پایه	درصد قیر خالص	درصد پلیمر SBS
PG58_S0	PG 58-22	۱۰۰	۰
PG64_S0	PG 64-22	۱۰۰	۰
PG58_S2	PG 58-22	۹۸	۲
PG64_S2	PG 64-22	۹۸	۲
PG58_S4	PG 58-22	۹٦	٤
PG64_S4	PG 64-22	۹٦	٤
PG58_S6	PG 58-22	۹٤	٦
PG64_S6	PG 64-22	۹٤	٦

ساخت نمونه‌های آسفالتی. برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی، ابتدا دانه‌بندی مصالح سنگی بر اساس حد وسط منحنی‌های دانه‌بندی شماره ٤ آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران و نشریه ۲۳٤ برای لایه توپکا انتخاب شد. در گام بعدی در ساخت نمونه‌ها، تعیین درصد قیر بهینه و طرح اختلاط مخلوط آسفالتی می‌باشد. بر اساس طرح اختلاط مارشال نمونه‌های آسفالتی با شش درصد قیر مختلف ۵، ۵/۵، ٦ و ٦/۵ ، ۷ و ۷/۵ درصد و با سه نمونه تکرار از هر نمونه تهیه شدند. پس از ساخت مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از دستگاه مارشال، هرکدام از نمونه‌ها تحت آزمایش استقامت مارشال قرارگرفته و عدد مارشال و عدد روانی مربوط به هر نمونه به‌دست آمد. سپس، مقدار قیر بهینه برای طرح اختلاط، بر اساس میانگین سه مقدار قیر متناظر با بیشترین استحکام مارشال، مقدار قیر متناظر با بیشترین وزن مخصوص و مقدار قیر متناظر با درصد فضای خالی ۳ و ۵ درصد تعیین شد. درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی پس از محاسبات، برابر ۵/٤ درصد برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی HMA اصلاح‌شده با پلیمر SBS تعیین شد.

به‌منظور ساخت مخلوط‌های آسفالتی از دستگاه متراکم‌کننده ژیراتوری استفاده شده‌است. با فرض یک میلیون محور معادل هم‌ارز و میانگین بیشترین دمای هوای برابر ٤۰ درجه سانتی‌گراد در هفت روز متوالی سال، به کمک مقادیر توصیه‌شده توسط پژوهشکده حمل‌ونقل، تعداد دوران اولیه، دوران طرح و دوران حداکثر به‌ترتیب برابر با ۸ و ۹۵ و ۱۵۰ تعیین گردید. به‌منظور

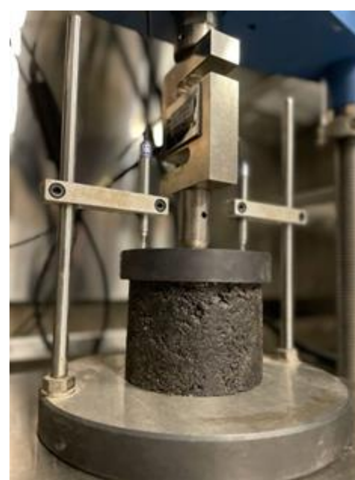
بررسی تأثیر درصد فضای خالی آسفالت بر مقاومت شیارشدگی، در دو سطح فضای خالی ۳ و ۵ درصد ساخته‌شده‌اند. نمونه‌های مورد استفاده در تست خزش استوانه‌هایی به قطر ۱۰ و ارتفاع ۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. نمونه‌های آسفالتی ساخته شده در شکل (۲) نشان داده شده‌است.

آزمایش خزش دینامیکی. هدف اصلی این آزمایش بررسی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی می‌باشد. مهم‌ترین خروجی این آزمایش نمودار تغییرات کرنش تجمعی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری می‌باشد که از سه قسمت اصلی تشکیل می‌شود . تعداد سیکل بارگذاری معادل با شروع ناحیه سوم، عدد روانی نامیده می‌شود. بر اساس یافته‌های اخیر در حوزه روسازی، که عدد روانی حاصل آزمایش خزش دینامیکی با مقاومت برشی آسفالت رابطه مستقیمی دارد و برای تخمین شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. به‌طورکلی با استفاده آزمایش خزش دینامیکی نمی‌توان عمق شیارشدگی را تعیین کرد، بلکه با توجه به نمودار کرنش تجمعی به تعداد سیکل‌های بارگذاری می‌توان به مقایسه عملکرد شیارشدگی نمونه‌ها با یکدیگر پرداخت. لذا عدد روانی در تست خزش بیانگر مقدار مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های شدید و آستانه اضمحلال روسازی در برابر شیارشدگی است.

در این تحقیق آزمایش خزش دینامیکی نمونه‌های آسفالتی شاهد و اصلاح‌شده با پلیمر مطابق با استاندارد Australian: AS 2891.12.1 با بارگذاری نیمه سینوسی و به‌صورت ۵۰۰ میلی‌ثانیه بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه استراحت انجام شده‌است. آزمایش خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های آسفالتی با دو مقدار فضای خالی ۳ و ۵ درصد در سطح تنش انحرافی مورداستفاده ٤۰۰ کیلو پاسکال و دماهای آزمایش ٤۰، ۵۰ و ٦۰ درجه سانتی-گراد انجام‌شده‌است. در شکل (۳) نمونه آسفالتی تحت آزمایش خزش دینامیکی نشان داده شده‌است.



شکل ۲ نمونه‌های آسفالتی تولید شده



شکل ۳ نمونه آسفالتی تحت آزمایش خزش دینامیکی

آماده‌سازی داده‌ها

برای استفاده از نتایج آزمایشگاهی در بخش مدل‌سازی، متغیرهای ورودی به مدل بر اساس تبدیل متغیرهای کیفی به کمی آماده‌شده‌است. به‌طور کلی در بخش مدل‌سازی از پنج متغیر ورودی و یک متغیر خروجی استفاده شده‌است. بر این اساس، متغیر نوع قیر بیان‌کننده رده PG قیر مصرفی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی است و بر اساس رده عملکردی در دو گروه PG64-22 و PG58-22 تقسیم شد. متغیر دوم در بخش مدل‌سازی درصد پلیمر SBS می‌باشد که شامل سه مقدار ۲، ٤ و ٦ درصد می‌باشد. سومین متغیر در بخش مدل‌سازی، متغیر محیطی دمای

آزمایش می‌باشد که شامل سه مقدار ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد است. پارامتر چهارم در قسمت مدل‌سازی، درصد فضای خالی می‌باشد که جز پارامترهای حجمی طرح اختلاط است و بر اساس دو درصد فضای خالی ۳ و ۵ درصد طراحی شد. برای دستیابی به درصد فضاهای خالی مدنظر، نمونه‌ها با تعداد دورهای ۹۰ و ۷۰ چرخش ژیراتوری با زاویه داخلی ۱/۱۶ و با فشار ۶۰۰ کیلو پاسکال متراکم گردید. آخرین متغیر در نظر گرفته‌شده در بخش مدل‌سازی رفتار شیارشدگی، تعداد سیکل بارگذاری در آزمایش خزش دینامیکی می‌باشد که متغیری از جنس بارگذاری است و بر اساس ۶ گام ۶۰۰، ۱۲۰۰، ۱۸۰۰، ۲۴۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۶۰۰ سیکل بارگذاری اعمال شده‌است.

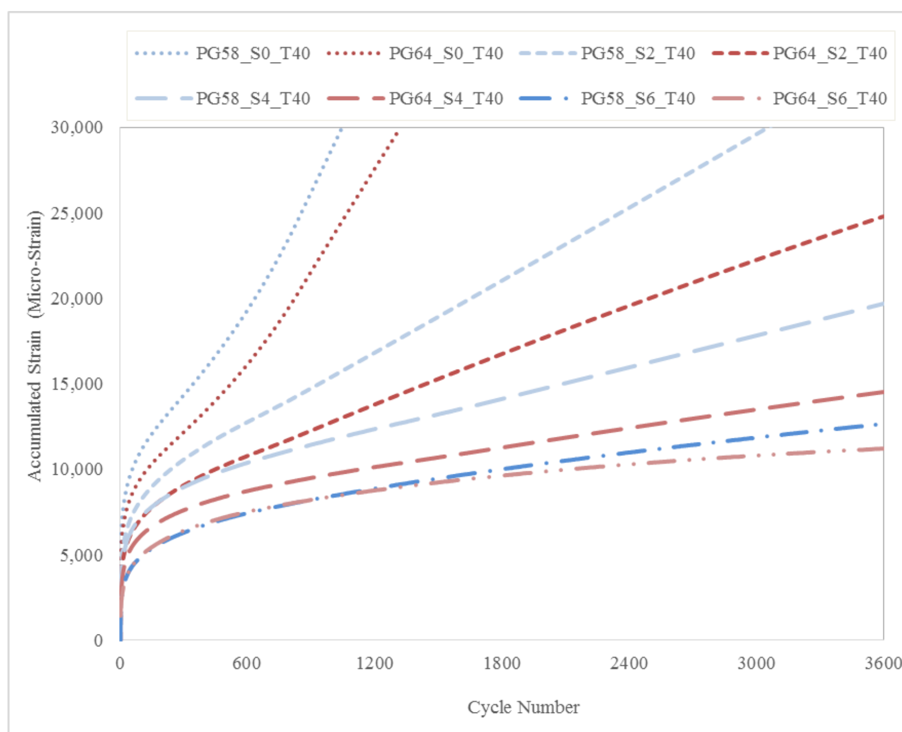
مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial neural network) ابزاری برای پردازش داده‌ها می‌باشند که مشابه شبکه‌های عصبی بیولوژیکی مثل مغز انسان، از تعداد زیادی عنصر به نام نورون با ارتباطات قوی داخلی که هماهنگ تشکیل‌شده‌اند. شبکه‌های عصبی مصنوعی با تحلیل داده‌های تجربی، قانون پنهان آن‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کند که به این عمل یادگیری می‌گویند و اصولاً این عمل مهم‌ترین ویژگی یک سیستم هوشمند است [27]. شبکه‌های عصبی با قابلیت ویژه در استنتاج مفاهیم از اطلاعات پیچیده یا مبهم، در استخراج روش‌هایی که آگاهی از آن‌ها برای انسان و دیگر فن‌های کامپیوتری پیچیده و دشوار است، استفاده می‌شود. الگوی و ساختار مورداستفاده در شبکه‌های عصبی با تعداد زیادی عناصر پردازشی فوق‌العاده به‌هم‌پیوسته تشکیل شده‌است و با تقلید از شبکه‌های عصبی بیولوژیکی مثل مغز انسان، برای حل یک مسئله باهم هماهنگ عمل می‌کند. شبکه‌های عصبی شامل سه جز ورودی، خروجی و پنهان است. گره‌های ورودی سیگنال‌های ورودی را از منابع خارجی دریافت می‌کنند که منابع در خارج از شبکه هستند. گره‌های خروجی سیگنال‌هایی را انتقال می‌دهند که مقادیر خروجی خارج از شبکه است. هر گره سیگنال‌هایی با قدرت‌های مختلف را به همسایگانش انتقال می‌دهد. در برخی از مدل‌های شبکه عصبی هر گره در هر لحظه در ارتباط با حالت محرک و تابع خروجی است که توسط آن حالت محرک فعلی را به سیگنال خروجی تبدیل می‌کند. شبکه‌های عصبی با توانایی قابل‌توجه خود در استنتاج نتایج از داده‌های پیچیده می‌توانند در استخراج الگوها و شناسایی گرایش‌های مختلفی که برای انسان‌ها و کامپیوتر شناسایی آن‌ها بسیار دشوار است استفاده شوند. از مهم‌ترین مزایای شبکه‌های عصبی می‌توان به یادگیری تطبیقی، خودسازمان‌دهی، عملگرهای بی‌درنگ، تحمل خطا، دسته‌بندی، تعمیم‌دهی و انعطاف‌پذیری اشاره کرد.

تحلیل داده‌ها و مدلسازی

همان‌طور که پیشتر بیان شد، هدف از این تحقیق، پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی بر اساس کرنش‌های رخ‌داده در آزمایش خزش دینامیکی است. بر این اساس، متغیرهای رده عملکردی قیر پایه (PG64-22 و PG58-22) ، درصد پلیمر SBS (۲ و ٤ و ٦ درصد)، دمای آزمایش (٤۰، ۵۰ و ٦۰ درجه سانتی‌گراد)، درصد فضای خالی (۳ و ۵ درصد) و تعداد سیکل بارگذاری به‌عنوان پارامترهای مؤثر بر رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته شدند.

تأثیر نوع قیر و درصد پلیمر . در شکل (٤) نتایج آزمایش خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر دو نوع قیر PG64-22 و PG58-22 و درصدهای مختلف پلیمر SBS در دمای ٤۰ درجه سانتی‌گراد و درصد فضای خالی ۵ درصد نشان داده شده‌است. بر اساس نتایج، استفاده از پلیمر و قیر PG64-22 موجب کاهش کرنش تجمعی مخلوط‌های آسفالتی و درنتیجه بهبود مقاومت شیارشدگی روسازی شده‌است. تأثیر مثبت پلیمر با درصد استفاده‌شده از آن رابطه مستقیم دارد. به‌طوری‌که با افزایش درصد پلیمر، عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی بهبود یافته‌است و بهترین مقاومت مربوط به نمونه حاوی ٦ درصد پلیمر با قیر PG64-22 می‌باشد. هم‌چنین، باوجود آنکه رفتار خزشی مخلوط‌های حاوی قیرهای پلیمری با رده‌های عملکردی متفاوت در سیکل‌های بارگذاری ابتدایی مشابه می‌باشند، ولی با افزایش تعداد بارگذاری و شدت یافتن شیارشدگی، مقادیر کرنش در مخلوط حاوی قیر PG64-22 به‌مرور بهتر می‌شود. این موضوع می‌تواند ناشی از سختی و ویسکوزیته بیشتر قیر باشد که به‌مرورزمان و در دوره خدمت‌دهی روسازی عملکرد بهتری در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک نشان می‌دهد.

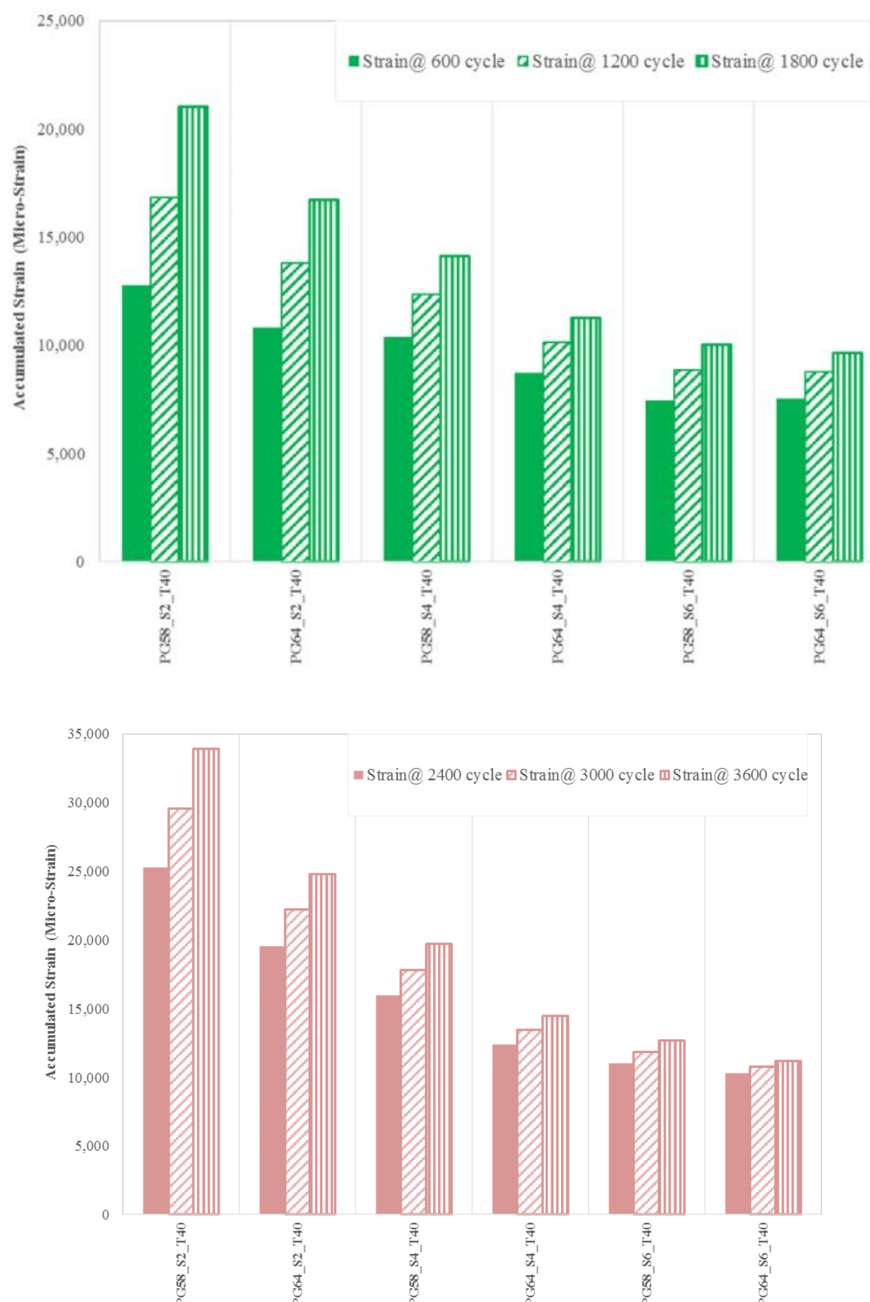


شکل ٤ نتایج آزمایش خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی با فضای خالی ٥ درصد در دمای ٤٠ درجه سانتی‌گراد

تأثیر سیکل بارگذاری. در این بخش رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر سیکل‌های مختلف بارگذاری با فضای خالی ٥ درصد در دمای ٤٠ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده‌است. با توجه به نتایج در شکل (٥) با افزایش سیکل بارگذاری تغییر شکل‌های دائمی ایجادشده در روسازی به شکل قابل‌توجهی افزایش یافته‌است و از مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی کم می‌شود. این در حالی است که افزودن پلیمر با عملکرد مناسب و مثبت موجب کاهش این نرخ شده‌است و روند کاهش مقاومت و افزایش خزش مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌بخشد. به‌طوری‌که بررسی نرخ کاهش کرنش بین سیکل‌های ٦٠٠ و ٣٦٠٠ در نمونه‌های حاوی قیر PG64-22 نشان می‌دهد، این پارامتر برای مخلوط‌های حاوی ٢، ٤ و ٦ درصد پلیمر به‌ترتیب برابر ١٣٠، ٦٦ و ٤٩ درصد می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، بررسی این شاخص نشان می‌دهد، با افزایش درصد پلیمر روند اضمحلال روسازی براثر شیارشدگی کاهش‌یافته و SBS به علت ساختار پلیمری و تشکیل زنجیره‌های قدرتمند موجب افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی شده‌است. همچنین سنجش مقادیر کرنش‌های بین سیکل‌های ١٨٠٠ تا ٣٦٠٠ نشان می‌دهد که این شاخص نیز با استفاده از پلیمر بهبود قابل‌توجهی یافته‌است و بر اساس نتایج برای نمونه‌های حاوی ٢، ٤ و ٦ درصد پلیمر به‌ترتیب برابر ٤٨، ٢٨ و ١٦ درصد می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، پلیمر SBS با افزایش سختی و ویسکوزیته ماستیک آسفالت موجب افزایش مقاومت و استحکام مخلوط آسفالتی می‌شود که این تأثیر مثبت با افزایش درصد پلیمر و سیکل بارگذاری به شکل بهتری نمایان می‌شود.

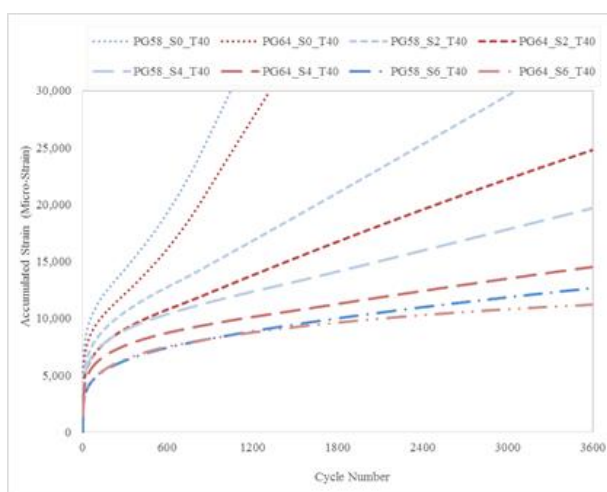
تأثیر دما و درصد فضای خالی. در این بخش در شکل‌های ٦ و ٧ رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی با درصد فضای خالی ٥ درصد، به ترتیب در دماهای ٤٠، ٥٠ و ٦٠ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده‌است. بر اساس نتایج، به‌طورکلی با افزایش دما کرنش‌های ایجادشده در روسازی افزایش‌یافته‌است و مقاومت شیارشدگی تضعیف می‌شود. بررسی سطوح دما نشان می‌دهد، تأثیر افزایش دما از ٥٠ به ٦٠ درجه سانتی‌گراد بر رفتار شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی به‌مراتب بیشتر از افزایش دما از ٤٠ به ٥٠ درجه سانتی‌گراد است. به‌عبارت‌دیگر، پس از ٥٠ درجه سانتی‌گراد مقاومت مخلوط‌های آسفالتی به‌طور قابل‌توجهی

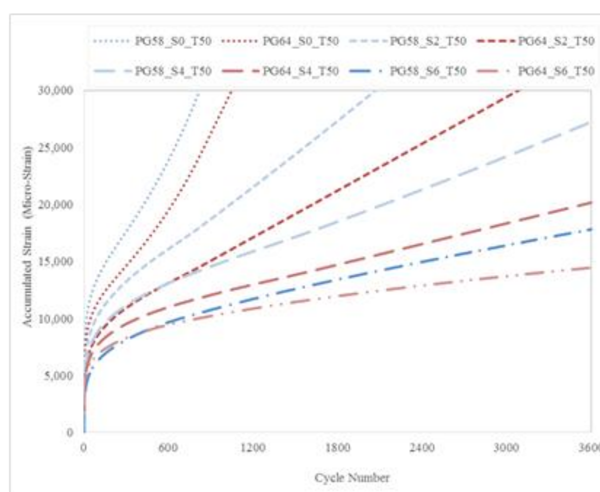
کاهش‌یافته‌است و این تأثیر موجب رفتار خزشی قابل‌توجه بر نمونه‌های آسفالتی شده‌است. درحالی‌که، بررسی تأثیر مواد پلیمری در این خصوص نشان می‌دهد استفاده از پلیمر SBS با بهبود رفتار قیر و افزایش سختی و مقاومت آن موجب شده‌است تا عملکرد مخلوط‌های اصلاح‌شده در برابر افزایش دما نسبت‌به مخلوط‌های خالص بهتر باشد. هم‌چنین همان‌طور که از نمودارهای شکل (٦) مشخص است، تأثیر کاهندگی میزان شیارشدگی به واسطه درصدهای مختلف افزودنی در دماهای بالاتر، کمتر بوده‌است و به عبارت دیگر پلیمر SBS در دماهای پایین‌تر عملکرد بهتری از خود نشان داده‌است.

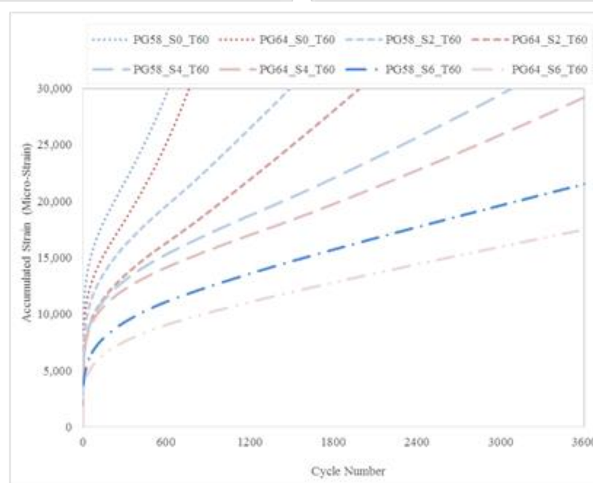


شکل ۵ مقادیر کرنش‌های تجمعی در انتهای سیکل‌های مختلف برای مخلوط‌های آسفالتی با فضای خالی ۵ درصد در دمای ٤٠ درجه سانتی‌گراد

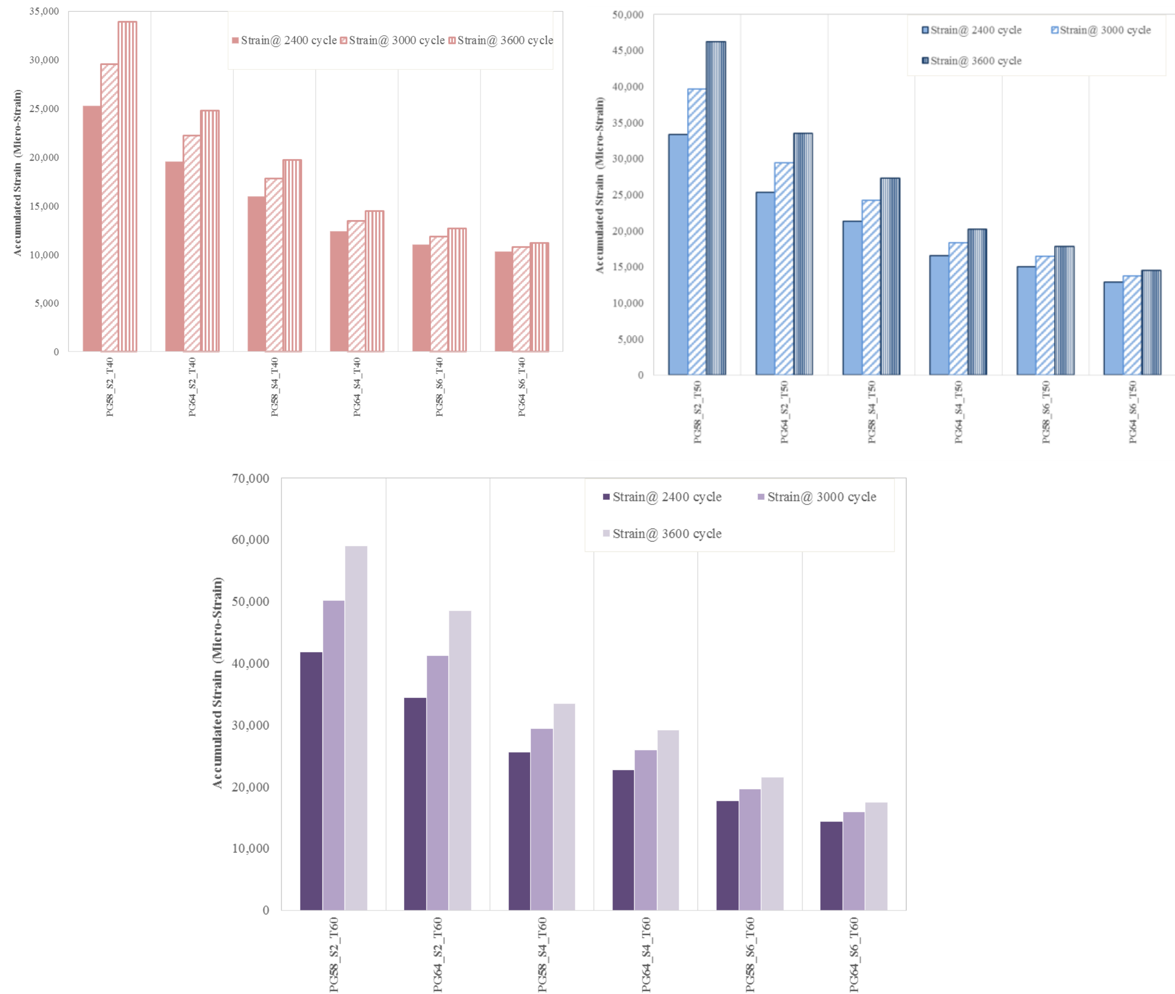
در شکل‌های (۸) و (۹) تأثیر درصد فضای خالی ۳ و ۵ بر رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد بررسی‌شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش درصد فضای خالی در مخلوط‌های آسفالتی موجب افزایش تغییر شکل‌های دائمی و کرنش‌های تجمعی در مخلوط می‌شود. به‌طوری‌که با افزایش درصد از ۳ به ۵ نمودار خزشی مخلوط‌های آسفالتی ازنظر شیب به‌شدت رشد کرده و تغییر شکل‌های ایجادشده به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته‌است. به‌طوری‌که بررسی مقادیر کرنش در سیکل‌های ۲٤۰۰، ۳۰۰۰ و ۳٦۰۰ نشان می‌دهد با افزایش درصد فضای خالی از ۳ به ۵ مقادیر کرنش‌ها به ترتیب و در حدود ۲۳، ۲۵ و ۲۸ درصد افزایش یافته‌است. این موضع نشان می‌دهد که تراکم و درصد فضای خالی تأثیر قابل‌توجهی بر کرنش‌های ایجادشده در روسازی به‌خصوص در ابتدای دوره بارگذاری دارد. این موضوع در نمونه‌های پلیمری نیز به‌طور مشابه دیده می‌شود که نشان می‌دهد تأثیر افزایش درصد فضای خالی بر رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر نوع قیر و مواد پلیمری نمی‌باشد و در هر صورت این تأثیر مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج، کمترین مقدار کرنش و تغییر شکل‌های پلاستیک در فضاهایی خالی ۳ و ۵ درصد مربوط به مخلوط حاوی پلیمری PG64-22 با ٦ درصد SBS می‌باشد که نشان می‌دهد باوجود افزایش درصد فضای خالی، ولی ساختار پلیمری تشکیل‌شده در قیر هم‌چنان به‌عنوان یک عامل مؤثر در افزایش مقاومت شیارشدگی عمل می‌کند.



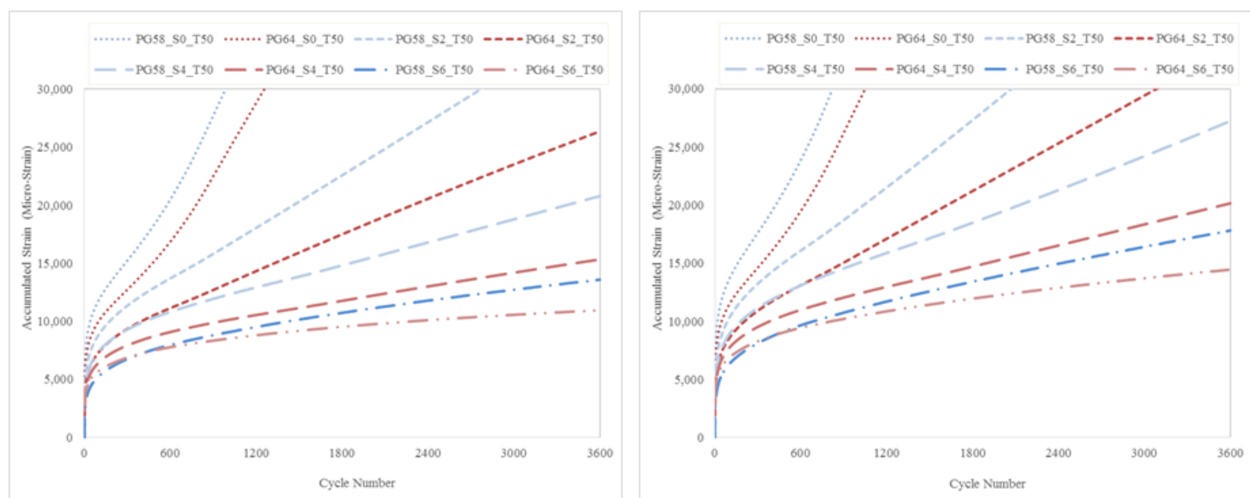




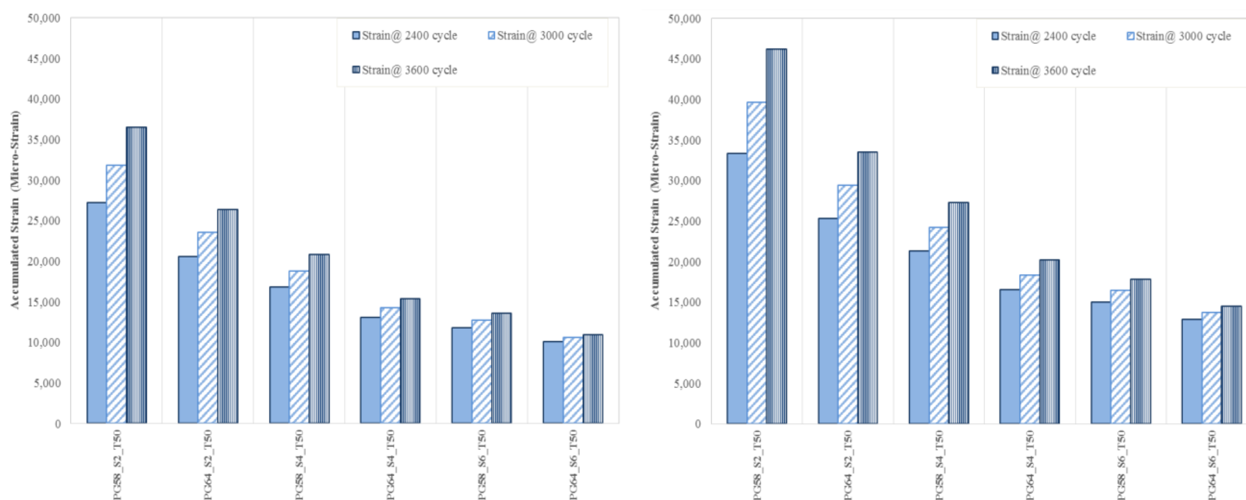
شکل ٦ نتایج آزمایش خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی با فضای خالی ۵ درصد در دماهای ٤۰ (شکل بالا چپ)، ۵۰ (شکل بالا راست) و ٦۰ (شکل پایین) درجه سانتی‌گراد



شکل ۷ مقادیر کرنش‌های تجمعی در انتهای سیکل‌های ۲٤۰۰، ۳۰۰۰ و ۳٦۰۰ در دماهای ٤۰ (شکل بالا چپ)، ۵۰ (شکل بالا راست) و ٦۰ (شکل پایین) درجه سانتی‌گراد



شکل ۸ نتایج آزمایش خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی با فضاهای خالی ۳ (شکل چپ) و ۵ (شکل راست) درصد در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد

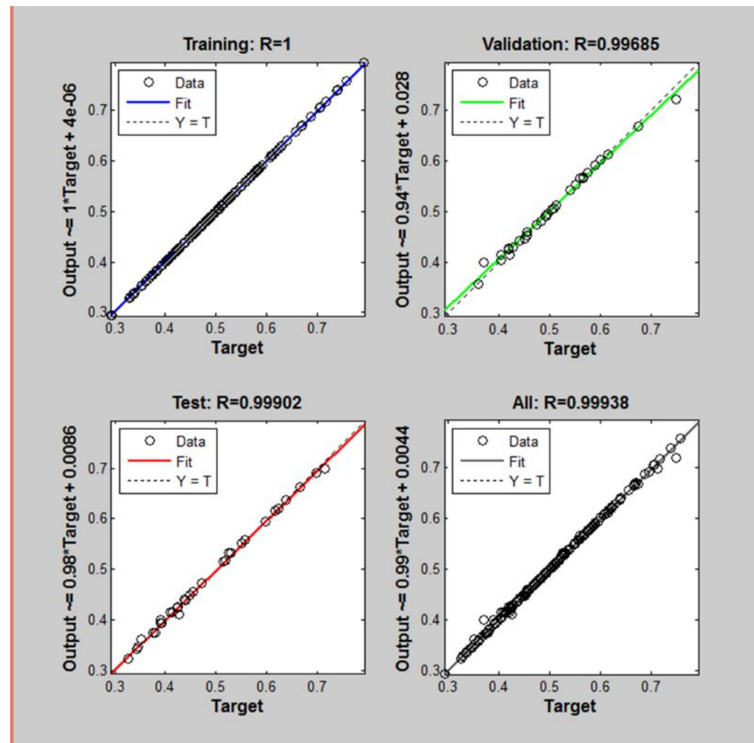


شکل ۹ مقادیر کرنش‌های تجمعی در انتهای سیکل‌های ۲٤۰۰، ۳۰۰۰ و ۳٦۰۰ برای مخلوط‌های آسفالتی با فضاهای خالی ۳ (شکل چپ) و ۵ (شکل راست) درصد در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد

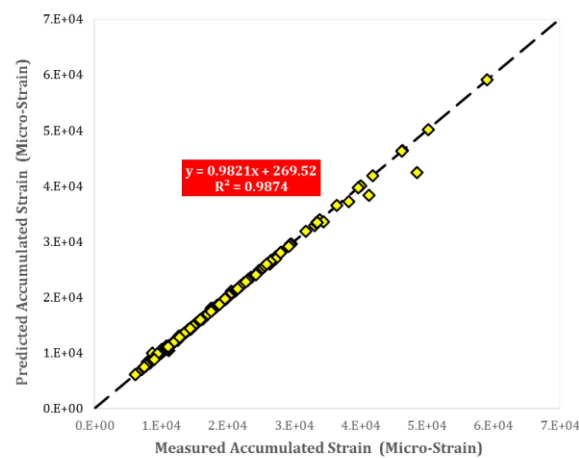
نتایج مدل پیش‌بینی شبکه عصبی مصنوعی

در این مطالعه برای بررسی تأثیر ساختار و معماری شبکه بر قدرت مدل، مدل‌های مختلف ANN با تعداد متفاوت لایه‌ها و گره‌های مخفی طراحی شده‌است تا بهینه‌ترین معماری شبکه برای پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی تعین شود. در همین راستا، ۱۲ ساختار متفاوت از شبکه‌های عصبی با تعداد یک تا سه لایه مخفی و با تعداد مختلفی از گروه‌های مخفی بین ۳ تا ۲۵ گره در هر لایه طراحی و ارزیابی شده‌است. تعداد گره‌های ورودی به شبکه شامل پنج متغیر درصد SBS، رده عملکردی قیر، دمای آزمایش، درصد فضای خالی و سیکل بارگذاری می‌باشد و خروجی شبکه مقادیر کرنش تجمعی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. به‌عنوان‌مثال، ساختار ۱–-۱۰–۱۰–۵ نشان‌دهنده یک شبکه عصبی با تعداد ۵ گره ورودی، ۲ لایه مخفی با تعداد گره‌های مخفی ۱۰ گره و یک لایه خروجی با یک گره است. برای تعیین معماری برتر شبکه نیاز است تا اختصاص وزن‌های به شبکه در چندین مرتبه تکرار شود و بهترین وزن‌های نهایی شبکه با کمترین خطا در کل شبکه به‌دست آید. بر همین اساس، هر یک از ۱۰ ساختار شبکه با ۵ بار تکرار موردسنجش قرار داده شده‌است تا معماری برتر شبکه با بهترین عملکرد و کمترین تعیین شود. به‌منظور بررسی عملکرد ساختارهای مختلف، از معیارهای R2، RMSE، VAF، MAPE و COV استفاده شده‌است. مقادیر آماری به‌دست‌آمده در این ساختار برای متغیرهای RMSE، VAF، MAPE، COV و R2 به‌ترتیب برابر ٤۸۸/۸، ۹۹/۷، ۰/۵۰٦، ۲/۷۹ و ۰/۹۹٦ می‌باشد. بر اساس نتایج، شاخص‌های RMSE، MAPE و COV نشان‌دهنده خطا و پراکندگی نتایج پیش‌بینی‌شده می‌باشند که با کاهش این مقادیر دقت مدل در پیش‌بینی افزایش می‌یابد. همچنین، شاخص VAF و R2 پارامترهای همبستگی و دقت می‌باشند که با افزایش این مقادیر صحت نتایج پیش‌بینی‌شده به نتایج آزمایشگاهی افزایش می‌یابد. بر همین اساس، بهینه‌ترین ساختار طراحی‌شده برای تخمین رفتار خزشی مخلوط آسفالتی تحت تأثیر متغیرهای موردبررسی، مدل ۱–۱۰–۱۰–۱۰–۵ با سه لایه مخفی و تعداد ده نورون در هر لایه دارای بهترین عملکرد می‌باشد.

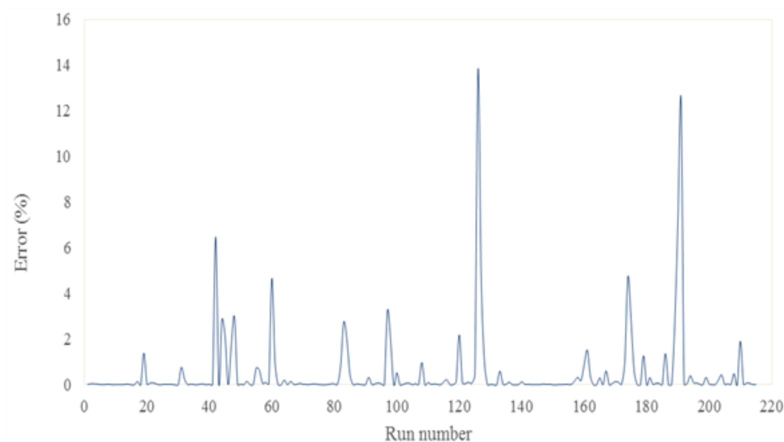
در شکل (۱۰) عملکرد مدل پیشنهادی بر اساس داده‌های نرمال شده نشان داده شده‌است. هم‌چنین در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) عملکرد مدل برتر با ساختار ۱–۱۰–۱۰–۱۰–۵ در پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی بر اساس داده‌های واقعی حاصل آزمایش خزش دینامیکی و پیش‌بینی‌شده کرنش تجمعی با استفاده از شبکه عصبی نشان داده شده‌است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود، همبستگی بسیار مناسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و تخمین زده‌شده برای مقادیر کرنش‌های ایجادشده در روسازی وجود دارد. به‌طوری‌که داده‌ها به خط ٤۵ درجه بسیار نزدیک می‌باشند و این به مفهوم دقت بالای نتایج به‌دست‌آمده و خطای کم مدل پیشنهادی می‌باشد.



شکل ۱۰ عملکرد مدل شبکه عصبی در چهار بخش آموزش، اعتبارسنجی، آزمون و کل مدل بر اساس داده نرمال شده



شکل ۱۱ مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده کرنش تجمعی مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۱۲ بررسی درصد خطای مقادیر پیش‌بینی‌شده بر اساس مقادیر واقعی

نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش شد تا رفتار خزشی و شیارشدگی بتن آسفالتی اصلاح‌شده با قیر پلیمری تحت تأثیر متغیرهای محیطی و ساختاری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان یکی از روش‌های قدرتمند پیش‌بینی شود. در این راستا، تأثیر دما، تعداد سیکل بارگذاری، درصد فضای خالی به‌عنوان متغیرهای مؤثر بر رفتار خزشی و تغییر شکل‌های ایجادشده در مخلوط‌های آسفالتی بررسی شد. هم‌چنین، با در نظر گرفتن دو نوع قیر PG64-22 و PG58-22 و درصدهای مختلف پلیمر SBS، تأثیر رده عملکردی قیر و مقدار پلیمر اصلاح‌کننده بر خصوصیات شیارشدگی موردسنجش قرار داده شد. درنهایت، پس از بررسی رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر متغیرهای موردبررسی، ساختار بهینه مدل شبکه عصبی در پیش‌بینی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر متغیرهای مؤثر تعیین شود و دقت و صحت نتایج پیش‌بینی‌شده کرنش تجمعی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از شاخص‌های آماری تعیین شد. در ادامه، نتایج به‌دست آمد:

- تأثیر نوع قیر و پلیمر نشان داد، استفاده از پلیمر و قیر PG64-22 موجب کاهش کرنش تجمعی مخلوط‌های آسفالتی و درنتیجه بهبود مقاومت شیارشدگی روسازی می‌شود و با افزایش درصد پلیمر، عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی بهبود می‌یابد و بهترین مقاومت مربوط به نمونه حاوی ٦ درصد پلیمر با قیر PG64-22 می‌باشد.
- بررسی هم‌زمان ساختار و سیکل بارگذاری بر رفتار خزشی مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد، با افزایش تعداد بارگذاری و شدت یافتن شیارشدگی، مقاومت در مخلوط حاوی قیر PG64-22 به‌دلیل افزایش سختی قیر به‌مرور بهتر می‌شود.
- بررسی تأثیر تعداد بارگذاری نشان داد با افزایش سیکل بارگذاری تغییر شکل‌های دائمی ایجادشده در روسازی به شکل قابل‌توجهی افزایش یافته‌است و از مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی کم می‌شود. این در حالی است که افزودن پلیمر با عملکرد مناسب و مثبت موجب کاهش این نرخ شده‌است و روند کاهش مقاومت و افزایش خزش مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌بخشد.
- مقادیر کرنش‌های بین سیکل‌های ۱۸۰۰ تا ٣٦۰۰ نشان داد، نتایج برای نمونه‌های حاوی ۲، ٤ و ٦ درصد پلیمر به‌ترتیب برابر ٤۸، ۲۸ و ١٦ درصد می‌باشد. بر اساس این مقادیر، پلیمر SBS با افزایش سختی و ویسکوزیته ماستیک آسفالت موجب افزایش مقاومت و استحکام مخلوط آسفالتی می شود که این تأثیر مثبت با افزایش در صد پلیمر و سیکل بارگذاری به شکل بهتری نمایان می‌شود.
- سنجش تأثیر فضای خالی بر رفتار خزشی نشان داد افزایش درصد فضای خالی در مخلوط‌های آسفالتی باعث افزایش تغییر شکل‌های دائمی و کرنش‌های تجمعی در مخلوط می‌شود. به‌طوری‌که با افزایش درصد از ۳ به ۵ نمودار خزشی مخلوط‌های آسفالتی ازنظر شیب به‌شدت رشد کرده و تغییر شکل‌های ایجادشده به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته‌است.
- نتایج بخش مدل‌سازی نشان داد، مدل ۱-۱۰-۱۰-۱۰-۵ با سه لایه مخفی و تعداد ده نورون در هر لایه دارای با داشتن مقادیر ٤۸۸/۸، ۹۹/۷، ۰/۵۰٦، ۲/۷۹ و ۰/۹۹٦ برای متغیرهای RMSE، VAF، MAPE، COV و R2 دارای بهترین عملکرد و کمترین خطا می‌باشد و مدل ارائه‌شده ازنظر پیش‌بینی رفتار خزشی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده پلیمری عملکرد بسیار خوبی دارد.
- بررسی ضریب همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده نشان داد که مقدار R2 برابر ۰/۹۸۷ می‌باشد که ارتباط قوی و معناداری بین داده‌ها وجود دارد و ساختار انتخاب شده برای مدل شبکه عصبی به‌خوبی توانسته‌است در بخش آموزش و آزمون داده‌ها را پیش‌بینی کند.
- بررسی درصد خطای مدل بر اساس اختلاف مقادیر پیش‌بینی‌شده و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین به‌ترتیب برابر ۰,۰۰۰۷٦، ۱۳/۸۱ و ۰/۵۱ می‌باشد. بر اساس نتایج، درصد خطای متوسط کمی مشاهده می‌شود که می‌توان گفت مدل قدرت و کارایی مناسبی در تخمین رفتار شیارشدگی مخلوط آسفالتی پلیمری تحت متغیرهای موردبررسی را دارد.

مراجع

1. Ziari, H., Moniri, A., and Norouzi, N., "The effect of nanoclay as bitumen modifier on rutting performance of asphalt mixtures containing high content of rejuvenated reclaimed asphalt pavement", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 37(17), pp. 1-6, (2019).
2. Ziari, H., Amini,. A., Goli, A., and Mirzaiyan. D., "Predicting rutting performance of carbon nano tube (CNT) asphalt binders using regression models and neural networks", *Construction and Building Materials*, Vol. 160, pp. 415-426, (2018).
3. Ameri, M., Mirzaiyan, D., and Amini, A., "Rutting resistance and fatigue behavior of gilsonite-modified asphalt binders", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 30, No. 11, pp. 04018292, (2018).
4. Arabani, M., and Yousefpour Taleghani, M., "Rutting behavior of hot mix asphalt modified by polyvinyl chloride powder", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 35(15), pp. 1621-1626, (2017).
5. Ali, Y., Irfan,. M., Ahmed, S., and Ahmed, Sh., "Empirical correlation of permanent deformation tests for evaluating the rutting response of conventional asphaltic concrete mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 29(8), pp. 04017059, (2017).
7. Coleri, E., Harvey, JT., Yang, K., and Boone, JM. "Investigation of asphalt concrete rutting mechanisms by X-ray computed tomography imaging and micromechanical finite element modeling", *Materials and structures*, Vol. 46(6), pp. 1027-1043, (2013).
8. Mirzaiyan, D., Amini, A., and Jalali, F., "Investigating the Influence of SBS and Gilsonite on the Rheological Properties of Asphalt Binder Using Statistical Analysis", *International Journal of Scientific and Technical Research in Engineering*, Vol. 4(1), pp. 31-42, (2019).
9. Vonk, W., Korenstra, J., Bodt, D., and Heimerikx, G., "SBS copolymers for road binders with improved processing characteristics and heat stability", EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, Vol. 3, (1996).
10. Chen, JS., and Huang, CC., "Fundamental characterization of SBS- modified asphalt mixed with sulfur", *Journal of applied polymer science*, Vol. 103(5), pp. 2817-2825, (2007).

۱۱. زیاری، ح.، بهبهانی، ح.، و ارجمندپور، ج.، «بررسی تأثیر انواع پلیمر ترموپلاستیک الاستومر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای»، *فصلنامه مهندسی حمل و نقل*، شماره ٦(٣)، ص. ٤١٣–٤٢٨، (٢٠١٥).

۱۲. ساعدی، س.، صادقیان اصل، گ.، و یثربی، س.ح.، «تأثیرتوأم استایرن بوتادین استایرن و پروپلاست در بهبود عملکرد آسفالت ماستیکی درشت‌دانه»، *فصلنامه مهندسی حمل و نقل*، شماره ١٠(٢)، ص. ٣٨٥–٣٩٩، (٢٠١٨).

۱۳. صاحب‌الزمانی، س.ح.، ضیاء علوی، س. م.و، و فرزانه، ا.، «مقایسه‌ی خواص عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با قیر پلیمری و گرانول خشک پلیمری»، *پژوهشنامه حل و نقل*، شماره ١٥(٣)، ص. ٣٦٩–٣٨٠، (٢٠١٨).

۱٤. فخری، م.، شاه ابراهیمی، ا.، و چاوشیان نائینی، س. ف.، «بررسی شیارشدگی و اثر خودترمیمی بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده»، *پژوهشنامه حمل و نقل*، شماره ١٧(١)، ص. ١٤٣–١٥٦، (٢٠١٩).

15. Sabouri, M., Mirzaeian, D., and Moniri, A., "Effectiveness of Linear Amplitude Sweep (LAS) asphalt binder test in predicting asphalt mixtures fatigue performance", *Construction and Building Materials*, Vol. 171, pp. 281-290, (2018).
16. Khodaii, A., and Mehrara, A., "Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt

mixtures using dynamic creep test", *Construction and Building Materials*, Vol. 23(7), pp. 2586-2592, (2009).

17. Mirzaiyan, D., Ameri, M., Amini, A., Sabouri, M., and Norouzi, A., "Evaluation of the performance and temperature susceptibility of gilsonite-and SBS-modified asphalt binders", *Construction and Building Materials*, Vol. 207, pp. 679-692, (2019).
18. Aflaki, S., and Tabatabaee, N., "Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran", *Construction and Building Materials*, Vol. 23(6), pp. 2141-2150, (2009).
19. Jafari, M., Babazadeh, M., and Aflaki, S., "Effects of stress levels on creep and recovery behavior of modified asphalt binders with the same continuous performance grades", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2505(1), pp. 15-23, (2015).

۲۰. دیواندری، ح.، و سادات خلردی، س.، «مدل سازی عمق شیارشدگی آسفالت با استفاده از نتایج آزمایش خزش دینامیکی»، *پژوهشنامه حمل و نقل*، شماره ۱۵(۲)، ص. ۱۵–۳۳، (۲۰۱۸).

۲۱. خبیری، م.، ذات اکرم، م.، و میرابی مقدم، م.، «بررسی آزمایشگاهی و تحلیل آماری اثر آلاینده‌ها بر مقاومت لغزندگی روسازی آسفالتی»، *فصلنامه مهندسی حمل و نقل*، شماره ۸(٤)، ص. ۵۸۹–٦۰۲، (۲۰۱۹).

۲۲. فرج اللهی، ا.، احدی، م.، و طایفی نصرآبادی، ع.، «مدل‌سازی شاخص وضعیت روسازی (PCI) با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی انتشار برگشتی»، *پژوهشنامه حمل و نقل*، شماره ۱۷(۱)، ص. ٤۷–٦۰، (۲۰۲۰).

۲۳. فخری، م.، کریمی، س.، و قربانی نیک، م.، «تخمین ناهمواری روسازی بر اساس خرابی‌های سطحی با استفاده از شبکه عصبی (مطالعه موردی: محورهای شریانی ایران)»، *فصلنامه مهندسی حمل و نقل*، شماره ۱۲(۳)، ص. ٦۹۷–۷۱۳، (۲۰۲۱).

24. Xiao, F.T and Amirkhanian, S.N., "Effects of binders on resilient modulus of rubberized mixtures containing RAP using artificial neural network approach", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 37(2), p. 129-13, (2009).
25. Wu, Z., Hu, S., and Zhou, F., "Prediction of stress intensity factors in pavement cracking with neural networks based on semi-analytical FEA", *Expert Systems with Applications*, Vol. 41(4), pp. 1021-1030, (2014).
26. Rooholamini, H., Imaninasab, R., and Vamegh, M., "Experimental analysis of the influence of SBS/nanoclay addition on asphalt fatigue and thermal performance", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 20(6), pp. 628-637, (2019).
27. Ziari, H., Amini, A., and Goli, A., "The effect of different aging conditions and strain levels on relationship between fatigue life of asphalt binders and mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 244, pp. 118345, (2020).